

高等学校机械类专业教材

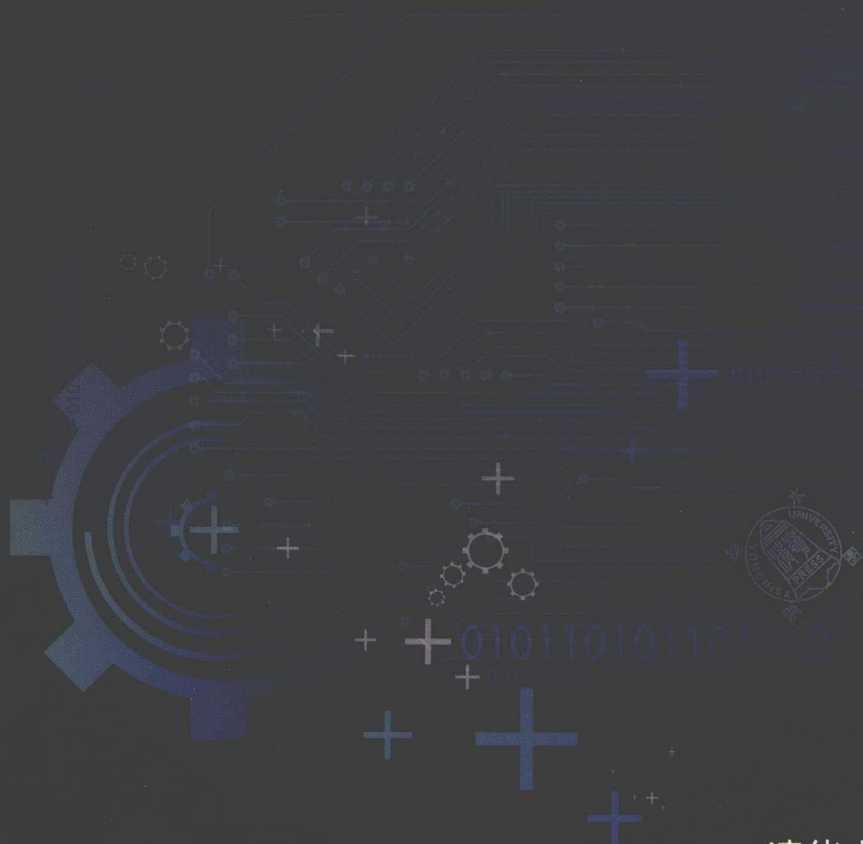
- 凝聚教学科研经验
- 注重专业能力的培养
- 以实用够用为宗旨
- 融理论实践于一体

传感与测试技术

CHUANGAN YU CESHI JISHU

卢艳军 主 编

刘利秋 王艳辉 徐 涛 副主编



清华大学出版社

传感与测试技术

卢艳军 主 编
刘利秋 王艳辉 徐 涛 副主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书吸取了作者多年的教学经验和科研成果,以理论够用为度,从实用的角度出发,并根据教学大纲的要求编写而成。

本书共分6章,详细介绍了测量的基础知识,测试信号及其测试系统的性能分析,常用传感器的原理,信号调理电路,位移、力、重量、转矩等机械量测量、温度测量、振动测试等常用参数的测试技术和计算机测试技术等内容。

本书可作为高等学校机械类专业及相关专业本科生的教材,也可供大专、高职等有关专业选用,还可以作为高等学校相关专业的教师及工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

传感与测试技术/卢艳军 主编. —北京:清华大学出版社,2012.6

ISBN 978-7-302-28748-3

I. ①传… II. ①卢… III. ①传感器—测试技术 IV. ①TP212.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 089222 号

责任编辑:刘金喜

封面设计:卢肖卓

版式设计:牛艳敏

责任校对:蔡娟

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62794504

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.25 字 数:480千字

版 次:2012年6月第1版 印 次:2012年6月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:33.00元

前 言

进入 21 世纪以来,测控技术和自动测试系统已经广泛地渗入到了生产、科研、试验活动等多方面,并在机械、汽车、冶金、航空、航天、石化、电力等众多领域得到了广泛应用。因此,传感与测试技术基础知识已经成为多数工科专业学生知识结构中的一部分。

本书共分为绪论、测试技术基础、常用传感器、信号调理电路、参数检测技术和计算机测试技术六个章节。

第 1 章绪论部分对测试的概念、测试工作的任务、测试技术的发展和测量的相关知识进行了简单的介绍。

第 2 章主要介绍了信号分析基础及测试系统性能分析等测试技术的基础知识。

第 3 章介绍了测试技术中常用的各种传感器的工作原理。

第 4 章主要介绍了测量电桥、信号的放大、信号转换、滤波器和调制解调等常用的信号调理电路。

第 5 章从应用的角度介绍了位移、速度、温度等几种参数的检测及振动测试技术。

第 6 章主要介绍了现场总线、自动测试系统、虚拟仪器等计算机测试技术的相关内容。

本书在对传感与测试技术的原理和检测方法进行介绍的同时,更突出了传感器及具体参数检测的内容,为学生在今后从事测试技术工作打下良好的理论基础。

本书第 1 章和第 5 章由沈阳航空航天大学的卢艳军博士编写,第 2 章由沈阳航空航天大学的徐涛博士编写,第 3 章由刘利秋副教授编写,第 4 章由王艳辉副教授编写,第 6 章由张晓东博士编写。

由于作者水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

本书教学课件下载地址: <http://www.tupwk.com.cn/downpage>。

服务邮箱: wkservice@vip.163.com。

编 者

2012 年 1 月 22 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测试技术概况	1
1.1.1 测试和测量系统	1
1.1.2 测试工作的任务	3
1.1.3 测试技术的发展	4
1.1.4 本课程的特点及目的	5
1.2 测量的基础知识	5
1.2.1 标准	5
1.2.2 测量、计量、测试	7
1.2.3 测量误差	9
思考题	12
第 2 章 测试技术基础	13
2.1 信号分析基础	13
2.1.1 信号分类	13
2.1.2 信号的频谱分析	16
2.1.3 信号的强度描述	32
2.2 测试系统性能分析	34
2.2.1 测试系统的一般数学模型	34
2.2.2 测试系统的特性与指标	40
2.2.3 不失真测量	46
思考题	49
第 3 章 常用传感器	51
3.1 传感器的定义、组成及分类	51
3.1.1 传感器的定义及组成	51
3.1.2 传感器的分类	52
3.1.3 对传感器的基本性能要求	54
3.2 电参量型传感器	55
3.2.1 电阻式传感器	55
3.2.2 电感式传感器	65
3.2.3 电容式传感器	72
3.2.4 电参量型传感器测量电路	78
3.3 电量型传感器	79

3.3.1	电压输出型传感器	79
3.3.2	电荷输出型传感器	89
3.3.3	电量型传感器测量电路	95
3.4	光电式传感器	96
3.4.1	概述	96
3.4.2	光电传感器的组成	97
3.4.3	光源	98
3.4.4	光电器件	100
3.4.5	光电传感器及其应用	105
3.4.6	新型光电器件	107
3.5	光纤传感器	110
3.5.1	光纤的结构及其传光原理	110
3.5.2	光纤传感器的工作原理、组成及分类	113
3.5.3	光纤传感器的应用	115
3.6	数字式传感器	117
3.6.1	感应同步器	117
3.6.2	编码器	123
3.6.3	光栅传感器	127
3.6.4	磁栅传感器	133
3.6.5	容栅传感器	138
3.6.6	谐振式传感器	141
	思考题	147
第4章	信号调理电路	151
4.1	电桥	151
4.1.1	电桥的分类	152
4.1.2	直流电桥	152
4.1.3	交流电桥	158
4.2	信号的放大电路	161
4.2.1	典型放大电路	161
4.2.2	电荷放大电路	168
4.2.3	仪表放大电路	169
4.2.4	程控增益放大电路	171
4.2.5	放大电路的应用实例	173
4.3	信号转换电路	175
4.3.1	阻抗与电压的转换	175
4.3.2	电压和电流的相互转换	177
4.3.3	电压和频率的相互转换	183

4.4 滤波电路	189
4.4.1 滤波器的分类	190
4.4.2 滤波器的基本参数	191
4.4.3 模拟滤波器	192
4.4.4 滤波器的应用	197
4.5 调制与解调	198
4.5.1 幅值调制与解调	198
4.5.2 频率调制与解调	203
4.6 信号调理电路在测试系统中的应用	205
4.6.1 心电信号采集系统中的调理电路	205
4.6.2 红外光幕靶信号采集系统中的调理电路	206
4.6.3 集成仪表放大器 INA114 在光功率自动控制电路中的应用	208
思考题	209
第 5 章 参数检测技术	211
5.1 机械量检测	211
5.1.1 位移检测	211
5.1.2 速度、加速度检测	218
5.1.3 力、重量和质量的检测	222
5.1.4 转矩测量	226
5.2 温度测量技术	230
5.2.1 温标与标定	231
5.2.2 测温法分类及其特点	233
5.2.3 热膨胀式测温方法	235
5.2.4 热阻式测温方法	236
5.2.5 热电式测温方法	241
5.2.6 集成温度传感器 AD590	243
5.2.7 热辐射测温	245
5.3 振动测试技术	250
5.3.1 振动和振动测量系统	250
5.3.2 振动测试系统特性测试	256
5.3.3 机械结构参数的估计	261
5.3.4 机械阻抗测试	264
5.3.5 振动信号的频谱分析	268
思考题	269
第 6 章 计算机测试技术	271
6.1 概述	271
6.2 现场总线和智能传感器	272

6.2.1	现场总线	272
6.2.2	智能传感器	281
6.2.3	智能传感器的集成技术	285
6.2.4	智能传感器系统智能化功能的实现方法	285
6.3	自动测试系统	286
6.3.1	自动测试系统的概念	286
6.3.2	自动测试系统的发展与应用	287
6.3.3	通用接口总线	288
6.3.4	VXI 总线	292
6.3.5	PXI 总线	297
6.4	虚拟仪器系统	300
6.4.1	概述	300
6.4.2	虚拟仪器的构成及特点	301
6.4.3	虚拟仪器的系统组成	303
6.4.4	VXIplus&play	304
6.4.5	虚拟仪器软件开发平台	304
6.4.6	虚拟仪器在自动测试中的应用	309
	思考题	311
	参考文献	313

第1章 绪 论

引言：在科学研究和工程试验中，需要探求物理现象之间的数量关系，测试技术就是人们揭示各种现象之间关系的必要手段。本章主要介绍测试的概念、测试工作的任务、测试技术的发展、测量的相关基础知识等，其目的是让学生初步了解有关测试技术的知识。

1.1 测试技术概况

人类对客观世界的认识和改造通常都是以测试为基础的。人类在很早从事生产活动时，就已经开始利用各种方法对长度(或距离)、面积、时间和重量等进行测量，其最初的计量单位或是和自身生理特点相联系(如长度)，或是与自然环境相联系(如时间)。在日常生活中，人类可通过感觉器官获取满足生活的大量信息。但随着人类对客观世界探索的加深和科学技术的发展，在生产活动和科学实验中，以及其他科学技术领域中，想要获取揭示事物内在规律的信息，无论在获取信息的幅值上，还是在时间、空间上，或在分辨信息的能力方面，人类的感覺和大脑功能都是十分有限的。测试作为定量地获取事物信息的一种手段，已成为现代科学技术研究的一个重要领域。

测试技术是信息技术、自动化技术和通信技术的基础。现代化的测试手段在很大程度上决定了生产和科学技术的发展水平，而科学技术的发展又为测试技术提供了新理论、新方法和新工艺，同时也对测试技术提出了更高的要求。

1.1.1 测试和测量系统

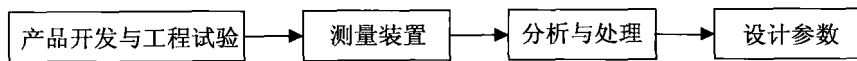
测试技术是测量和试验技术(Measurement and Test Technique)的统称。测试就是依靠一定的科学技术手段定量地获取某种研究对象原始信息的过程，定量地描述事物的状态变化和特征的过程。测量的内涵是指对被检测对象的物理、化学、工程技术等方面的参量做数值测定工作；试验的内涵是指在真实情况下或模拟情况下对被研究对象的特性、参数、功能、可靠性、维修性、适应性、保障性、反应能力等进行测量和度量的研究。试验与测量技术紧密相连，试验离不开测量。在各类试验中，通过测量取得定性定量数值，以确定试验结果。而测量是随着产品试验的阶段而划分的，不同阶段的试验内容或需求则有相对应的测量设备和系统，用以完成试验数值、状态、特性的获取、传输、分析、处理、显示、报警等功能。例如，产品测试是通过试验和测量过程，对被检测对象的物理、化学、工程技术等方面的参量、特

性等做数值测定工作，是取得对试验对象的定性或定量信息的一种基本方法和途径。

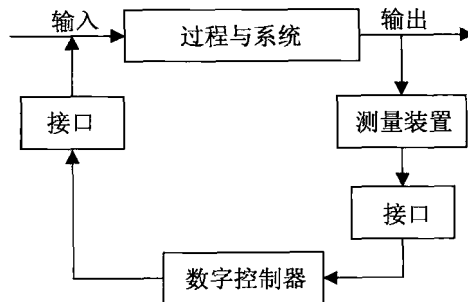
工程技术的研究对象往往十分复杂，许多问题至今还难以进行完善的理论分析和计算，需要通过实验研究来解决。测试工作需要一定的测试设备，而测试系统是一种能将被测参数转换成可直接观测指示或等效信息的测试设备，其中关键单元是传感器。传感器是指由敏感元件直接感受被测量，并将被测量转变为可用电量的一套完整的测量装置。信息本身不具备传输、交换的功能，只有通过信号才能实现这种功能，因此测试技术与信号密切相关。信息、信号、测试系统之间的关系可表述为：获取信息是测试的目的，信号是信息的载体，测试是得到被测参数信息的技术手段。

在产品开发或其他目的的试验中，一般要在被测对象运行过程中或试验激励下，测量或记录各种随时间变化的物理量，通过随后的进一步处理或分析，得到要求的定量的试验结果。在运行监测或监控系统中，实时测量的各种时间变量则用于过程参数监视、故障诊断或者作为控制系统的控制、反馈变量。不同用途对测量过程和结果的要求也不同，例如在反馈控制系统中，可能要求测量系统的输出以很小的滞后不失真地跟踪以一定速率变化的被测物理量。如果只要求不失真地测量和显示物理量变化过程，则对滞后就没有要求。可见，不同的用途和要求，测量系统的组成环节及其构成方式也不同。

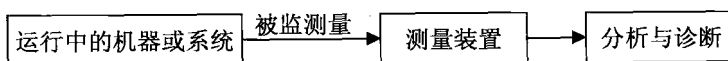
一般来说，测量系统的用途如图 1.1 所示。可见，不同用途的测量系统，根据需要可以由不同的部分组成。测量系统的一般构成如图 1.2 所示。构成测量系统的所有设备，即为了确定被测量值所必需的器具和辅助设备的总体称为测量装置。



(a) 产品开发与工程试验过程



(b) 过程与系统控制



(c) 监测与诊断

图 1.1 测量系统的用途

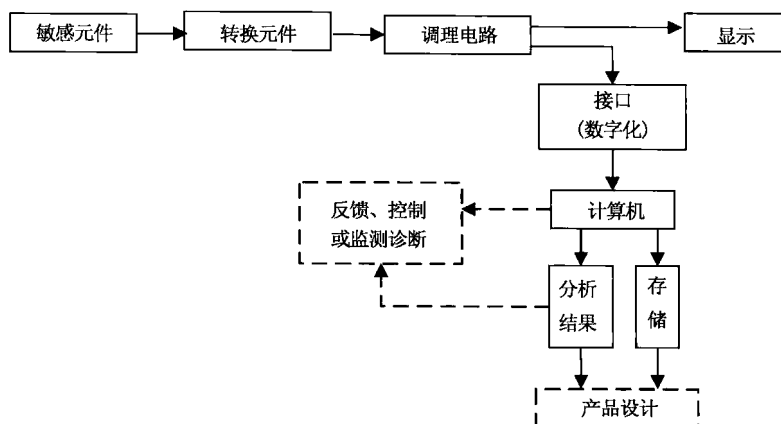


图 1.2 测量系统的一般构成

1.1.2 测试工作的任务

测试工作的基本任务是通过测试手段获取信息。因此，测试技术是信息科学的源头和重要组成部分。测试工作就是对研究对象中的有关信息量作出比较客观、准确的描述，使人们对其有一个恰当的全面的认识，并达到进一步改造和控制研究对象的目的。研究对象所包含的信息是相当丰富的，在实践中，人们总是把根据要求测出的感兴趣的信息以信号的形式表达出来，这样信号就成了某一信息的特定载体。

信号是信息的载体，某些信息是可直接检测的，而有些信息是不容易直接检测的，需通过对其相关的信息进行加工处理才能获得。一般来说，测试工作总是采用最简捷的方法获得与研究任务相联系的、最有用的、能表征研究对象特征的有关信息，而不能也不可企图获取该事物的全部信息。

人类早就进行测试工作了，但是迄今还很难给测试规定一个明确的定义及工作范围。测试是为了获取有用的信息，而信息是以信号的形式表现出来的。根据一个研究对象如何估计它的模型结构，如何设计试验方法，以最大限度地突出所需要的信息，并以比较明显的信号形式表现出来，这无疑也是测试工作的一部分。由此可见，测试工作是一件非常复杂的工作，需要多种学科知识的综合运用。当然，根据所测任务的繁简和要求的不同，并不是每项测试工作都要经历相同的步骤。如天平和砝码就可以称重，用一根尺子就可以量布。但测定自动武器的运动或研究机床的动态特性所进行的测试是相当复杂的。

从广义的角度来讲，测试工作涉及试验设计、模型试验、传感器、信号加工与处理(传输、加工和分析、处理)、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容。因此，测试工作者应当具备这些方面的相关知识。从狭义的角度来讲，测试工作是指在选定激励方式下，所进行的信号的检测、变换、处理、显示、记录及电量输出的数据处理工作。

1.1.3 测试技术的发展

现代生产的发展和工程科学研究对测试及其相关技术的需求极大地推动了测试技术的发展,而现代物理学、信息科学、计算机科学、电子与微机械电子科学与技术的迅速发展又为测试技术的发展提供了知识和技术支持。可见,现代科学技术的不断发展,为测试技术水平的提高创造了物质条件,同样,高水平的测试技术又会促进新科技成果的不断发现和创新,两者之间是相辅相成的。大致来说,测试技术的发展方向有下列几个方面。

1. 量程范围更加宽广

随着测试要求的不断提高,需要量程范围更广的测试仪器和相应配套的标定装置。例如,在火炮膛压测试技术中,对常规火炮膛压小于 600MPa 的测试,采用铜柱(或铜球)测压器或压电传感器均可满足要求。为提高火炮射程和射击精度,在高膛压火炮的研究中,膛压可达到 800~1000MPa,甚至 1000MPa 以上,并伴随着 $9.8 \times 10^5 \text{m/s}^2$ 的高冲击加速度。这就促使膛压测试技术要有相应的发展,需要研制测压范围更宽的压力传感器及配套的压力动态标定装置。

2. 传感器向新型、微型、智能型发展

传感器是信号的检测工具。精度高、灵敏度高且量程范围大及小型化是传感器发展的一个重要方向。新材料,特别是新型半导体材料的研制成功,促进了很多对于力、热、光、磁等物理量和气体化学成分敏感的器件的发展。光导纤维不仅可用来传输信号,而且可作为物性型传感器。另一个引人注目的发展是,由于微电子的发展,很有可能把某些电路乃至微处理器和传感测量部分做成一体,即传感器具有放大、校正、判断和一定的信号处理功能,组成所谓的“智能传感器”。

3. 测量仪器向高精度和多功能方向发展

测量仪器及整个测量系统精度的提高,使测得数据的可信度也相应提高。在产品研制过程中要进行大量试验,测量某些性能参数,然后对所测数据进行统计分析。在相同条件下要试验若干次,所测参数才具有一定的可信度。仪器精度的提高,可减少试验次数,从而减少试验费用,降低产品成本。在提高测量仪器精度的同时应扩大仪器的功能。计算机技术的发展使测试技术也产生了革命性的变换,在许多测试系统中,由于使用了计算机而使仪器的测量精度更高,功能更全。

4. 参数测量与数据处理向自动化发展

一个产品的大型综合性实验,准备时间长,待测参数多,靠人工检查,耗费时间长;众多的数据依靠手工去处理,不仅精度低,处理周期也过长。现代测试技术的发展,使采用计算机为核心的自动测试系统成为可能,该系统一般能实现自动校准、自动修正、故障诊断、信号调制、多路采集和自动分析处理,并能打印输出测试结果。

5. 计算机测试系统与虚拟仪器的应用

传感器网络及仪器总线技术、因特网与远程测试、测试过程与仪器控制技术,以及虚拟仪器及其编程语言等的发展都是现代工程测试技术发展的重要方面。

1.1.4 本课程的特点及目的

本课程主要讨论测试信号及系统性能分析、工程测试中常用的传感器的工作原理、常用的信号调理电路以及信号分析的基础知识,并在此基础上,讨论工程中几种常见参数的检测技术,以及计算机测试技术的发展。

对于高等学校工程类的有关专业来说,本课程是一门技术基础课,它综合了物理学、电工电子学、力学、信号与系统、控制工程及计算机技术等课程的内容。本课程具有很强的实践性,因此,在教学中,安排了必要的实验环节,其目的是通过必要的实验,使学生获得对测试工作的感性认识,为将来参加实际测试工作打下良好的基础。

本课程的教学目的是使学生对工程测试工作有一个比较完整的概念,初步掌握测试所需要的基本知识和技能,针对工程当中实际的参数检测或测试问题,能够较为正确地选用测试方法和测试设备,并自行设计和选用测试系统,同时,为进一步学习、研究和处理工程测试技术问题打下坚实的基础。

1.2 测量的基础知识

在科学研究和工程试验中,需要探求物理现象之间的数量关系。测量就是人类认识客观世界,获取定量信息的重要手段。测量的最基本方式是比较,即将待测的未知量和预定的标准量进行比较。为了使测量结果具有普遍的科学意义,测量必须具备一定的条件:首先,测量过程是被测量的量与标准或相对标准量的比较过程,作为比较用的标准量值必须是已知的,且是合法的,才能确保测量值的可信度及保证测量值的溯源性;其次,进行比较的测量系统必须进行定期检查、标定,以保证测量的有效性、可靠性,这样的测量才有意义。由测量所得到的被测对象的量值表示为数值和计量单位的乘积。

1.2.1 标准

1. SI 的构成及基本单位

为了求得国际上的统一,国际计量大会建立了统一的“国际单位制”(International System of Unit),简称 SI 制。SI 制由 SI 单位和 SI 单位的倍数单位构成。SI 单位是国际单位制中由基本单位和导出单位构成的一贯单位制的那些单位。SI 导出单位又包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位和具有组合形式的导出单位。

SI 制规定了 7 个基本单位。SI 导出单位是用基本单位以代数形式表示的单位,其中采用基本单位的乘除运算符号来表示的单位称为组合单位,如速度的 SI 单位为 m/s。

在 SI 的导出单位中,规定了由国际计量大会通过的专门名称和符号,如能量的单位通常

用焦耳(J)来代替牛顿米(N·m)。

用 SI 基本单位、具有专门名称的 SI 导出单位和 SI 辅助单位以代数形式表示的单位称为组合形式的 SI 导出单位。

SI 单位的倍数单位包括 SI 单位的十进制倍数和分数单位, 如 10^6 称为兆(M)。SI 单位的倍数单位不能单独使用。

在 SI 制中, “量纲”代表一个实体(被测量)的确定特征, 而量纲单位则是该实体的量化基础。例如长度量纲(例如, 长度是一个量纲, 厘米是长度的一个单位), 一个量纲是唯一的, 而一种特定的量纲可以用不同的单位来测量。还可用英尺、米、英寸或英里等单位测量。在 SI 制中, 基本量约定为: 长度、质量、时间、温度、电流、发光强度和物质的量等七个量。它们的量纲分别用 L、M、T、 θ 、I、N 和 J 表示。导出量的量纲可用基本量量纲的十进制倍数或分数来表示。

2. SI 基本单位

国际单位制规定的 7 个基本单位为米、千克、秒、安培、开尔文、坎德拉、摩尔。它们的单位代号分别为: 米(m)、千克(kg)、秒(s)、开(K)、安(A)、坎(cd)、摩(mol)。

(1) 米(m)是光在真空中($1/299\,792\,458$)s 时间间隔内所经路径的长度。规定英制长度单位和 SI 制长度单位之间的换算关系为: 1 英寸=2.54 厘米。

(2) 千克(kg, 公斤)等于国际千克原器的质量。规定英制质量单位和 SI 制质量单位之间的换算关系为: 1 磅=453.59 237 克。

(3) 秒(s)是铯 133(Cs-133)原子基态的两个超精细能级间跃迁对赢得辐射 9 192 631 770 个周期的持续时间。

(4) 安培(A)是电流强度单位, 在真空中两根相距 1 米的无限长的圆截面极小的平行直导线内通以恒定的电流, 使这两根导线之间每米长度产生的力等于 2×10^{-7} 牛顿, 这个恒定电流就是 1 安培。

(5) 开尔文(K)是热力学温度单位, 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.15$ 。热力学温标是建立在热力学第二定律基础上的, 是一种理想的温标。热力学温标因绝对零度无法达到而难以实现, 故又规定用国际温标来复制温度基准。国际温标由基准点、基准温度计和补插公式三部分组成。摄氏温标是工程上通用的温标。摄氏温度和国际温标间的换算关系为:

$$T = t + 273.15(\text{K})$$

式中, t 为摄氏温度, T 为国际温标。

(6) 坎德拉(cd)是发光强度单位。规定 1 坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为 $(1/683)$ W/sr。

(7) 摩尔(mol)是一系统的物质的量, 该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12 的原子数目相等。使用摩尔时, 基本单元可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子, 或是这些粒子的特定组合。

在国际单位制中, 平面角的单位——弧度(rad)和立体角的单位——球面度(sr)未归入基本单位或导出单位, 称之为辅助单位。其可以做基本单位使用, 也可以做导出单位使用。

1.2.2 测量、计量、测试

测量、计量、测试是三个密切关联的术语。测量(Measurement)是指以确定被测对象的量值为目的而进行的实验过程。如果测量涉及实现单位统一和量值准确可靠则被称为计量。因此,研究测量、保证测量统一和准确的学科被称为计量学(Metrology)。具体地说,计量学将研究可测的量、计量单位、计量基准、标准的建立、复现、保存及量值传递、测量原理与方法及其准确度、观察者的测量能力,物理常量及常数、标准物质、材料特性的准确确定,以及计量的法制和管理。实际上,计量一词只用做某些专门术语的限定语,如计量单位、计量管理、计量标准等。测试(Measurement and Test)是指具有试验性质的测量,或测量和实验的综合。

一个完整的测量过程必定涉及被测对象、计量单位、测量方法和测量误差。它们被称为测量四要素。

1. 基准和标准

为了确保量值的统一和准确,除了对计量单位作出严格的定义外,还必须有保存、复现和传递单位的一整套制度和设备。

基准是用来保存、复现计量单位的计量器具。它是具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具。基准通常分为国家基准、副基准和工作基准三种等级。

国家基准是指在特定计量领域内,用来保存和复现该领域计量单位并具有最高的计量特性,经国家鉴定、批准为统一全国量值最高依据的计量器具。

副基准是指通过与国家基准对比或校准来确定其量值,并经国家鉴定、批准的计量器具。在国家计量检定系统中,副基准的位置仅低于国家基准。

计量标准是指用于检定工作计量器具的计量器具。

工作计量器具是指用于现场测量而不用于检定工作的计量器具。一般测量工作中使用的绝大部分都是这一类计量器具。

2. 量值的传递和计量器具检定

通过对计量器具实施检定或校准,将国家基准所复现的计量单位量值经过各级计量标准传递到工作计量器具,以保证被测对象量值的准确和一致,这个过程就是所谓的“量值传递”。在此过程中,按检定规程对计量器具实施检定的工作对量值的准确和一致起着最重要的保证作用,是量值传递的关键步骤。

所谓计量器具检定(Verification of Measuring Instrument),是指为评定计量器具的计量特性,确定其是否符合法定要求所进行的全部工作。检定规程是指检定计量器具时必须遵守的法定技术文件。计量器具检定规程的内容包括:适用范围、计量器具的计量特性、检定项目、检定条件、检定方法、检定周期以及检定结果的处理等。计量器具检定规程分为国家、部门和地方三种。它们分别由国家计量行政主管部门、有关部门和地方制定并批准颁布,作为检定所依据的法定技术文件,分别在全国、本部门、本地区实行。

所有的计量器具都必须实施相应的检定。其中社会公用的计量标准、部门和企事业单位使用的最高计量标准,用于贸易结算、医疗卫生、环境监测等方面的某些计量器具,则必须

由政府计量行政主管部门所属的法定计量检定机构或授权的计量检定机构对它们实施定点定期的强制检定。检定合格的计量器具被授予检定证书和在计量器具上加盖检定标记；不合格者或未经检定者，则应停止使用。

3. 测量方法

测量的基本形式是比较，将待测的未知量和预定的标准量进行比较。根据测量的方法、手段、目的、性质等可对测量进行分类。通常按照测量值获得的方法来分，测量可分为直接测量和间接测量。

1) 直接测量

直接测量是指无需经过函数关系的计算，直接通过测量仪器得到被测量值的测量。直接测量又可以分为直接比较和间接比较两种。

(1) 直接将被测物理量和标准量进行比较的测量方法称为直接比较。例如测量一根钢管的长度，最常用的办法是用一把钢尺和它做比较，钢尺(米尺)就是作长度测量用的标准。假设测得的钢管长度是长度标准(米)的2.4倍，就用2.4米作为钢管长度的示值。再如电阻的测量，通过惠斯通电桥将未知电阻和标准电阻之间进行比较，就可得未知电阻量值。可见，直接比较最显著的特点是待测物理量和标准量是同一种物理量。

(2) 直接测量的另一种方法是间接比较。例如，测量体温，最常用的是水银温度计。根据水银热胀冷缩的物理规律，温度越高，水银膨胀得越厉害，毛细管中的水银柱就上升得越高，水银柱的高度和体温之间有着确定的函数关系，因此，可以用水银柱的高度作为被测温度的量度。这是通过热胀冷缩的规律把温度的高度转化为水银柱的长度，然后，通过对水银柱长度的比较间接地得出被测温度的大小，这就是间接比较。简言之，间接比较是利用仪器仪表，把原始形态的待测物理量的变化变换成与之保持已知函数关系(通常是线性关系)的另一种物理量的变化，并以人的感官所能接受的形式(通常是位置的变化)，在测量系统的输出端显示出来。用弹簧测力，用直流电流表测电流等都是间接比较的例子。

无论是直接比较还是间接比较，都是直接用测量仪器测出待测量的大小，都属于直接测量。由此可以看出，为使测量结果具有普遍的科学意义，测量必须具备两个条件：首先，用作比较的标准必须是精确已知的，得到公认的；其次，进行比较的测量系统必须工作稳定，经得起检验。

2) 间接测量

间接测量是在直接测量的基础上，根据已知的函数关系，计算出所要测量的物理量的大小。例如平均速度的测量，先用直接测量方法测出运动的距离和通过这段距离所用的时间，然后计算出平均速度。还有一种间接测量方法是将直接测量值或间接测量值与被测量值之间按照已知关系组合成一组方程(函数关系)，通过解方程组得到被测值的量值，该方法可以在不提高计量仪器准确度的情况下，提高被测量值的准确度。

一般尽可能不采用间接测量，因为它的准确度往往不如直接测量的高，但是，有时候所要测的物理量本身就是根据数学关系定义的，没有比较的标准可供使用(如马赫数、冲量等)，或者没有能够探测所要测量的物理量的仪器，在这些场合，就不得不采用间接测量了。

4. 测量术语

在进行测量时,要正确掌握测量装置及测量过程,需要正确理解一些相关的术语。

(1) 传感器:它直接作用于被测量,并能按一定规律将被测量转换成同种或别种量值输出的器件,通常由敏感元件和转换元件构成。

(2) 测量变换器:提供与输入量有给定关系的输出量的测量器件。当测量变换器的输入量为被测量时,该测量变换器实际上就是传感器;反过来,传感器也就是第一级的测量变换器。当测量变换器的输出量为标准信号时,它就被称为变送器。在自动控制系统中,经常能够用到变送器。

(3) 检测器:用以指示某种特定量的存在而不必提供量值的器件或物质。在某些情况下,只有当量值达到规定的阈值时才有指示。

(4) 测量器具的示值:由测量器具所指示的被测量值。示值用被测量的单位表示。

(5) 准确度等级:用来表示测量器具的等级或级别。每一等级的测量器具都有相应的计量要求,用来保持其误差在规定极限以内。

(6) 标称范围及量程:也称为示值范围,指测量器具标尺范围所对应的被测量示值的范围。且在测量器具的误差处于允许极限内的情况下,测量器具所能测量的被测量值的范围,即为测量范围。标称范围的上下限之差的模称为量程,例如温度计的标尺范围的起点示值为 -20°C ,终点示值为 $+50^{\circ}\text{C}$,则其标称范围即为 $-20\sim+50^{\circ}\text{C}$,其量程为 70°C 。

(7) 漂移:测量器具的计量特性随时间的缓慢变化。

1.2.3 测量误差

测量结果总是有误差的。误差自始至终存在于一切科学试验和测量过程中。

1. 误差的概念

1) 真值

真值即真实值,是指在一定时间和空间条件下,被测物理量客观存在的实际值。真值通常是不可测量的未知量,一般来说,真值是指理论真值、规定真值和相对真值。

(1) 理论真值:理论真值也称绝对真值,如平面三角形内角之和为 180° 。

(2) 规定真值:国际上公认的某些基准量值,如米是光在真空中 $(1/299\,792\,458)\text{s}$ 时间间隔内所经路径的长度。这个米基准就当作计量长度的规定真值。规定真值也称为约定真值。

(3) 相对真值:是指计量器具按精度不同分为若干等级,上一等级的指示值即为下一等级真值,此真值称为相对真值。

2) 误差

误差定义为测量结果与被测量真值之差,即:

$$\text{测量误差} = \text{测量结果} - \text{真值}$$

此定义联系着三个量,已知其中的两个量,就能得到第三个量。

3) 残余误差

残余误差也称为残差,是指测量结果减去被测量的最佳估计值(即约定真值)。其中,测